

УДК 655.3

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗНОСА И УПРАВЛЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬЮ В ПОЛИГРАФИИ

Д. М. МЕДЯК<sup>+</sup>, М. И. КУЛАК

В статье определены виды износа, характерные для различных объектов полиграфии: печатных машин и полиграфической продукции. В работе предложена формула, учитывающая различные механизмы и факторы износа, свойства материалов и сред, параметры, определяющие износ. Определены факторы, вызывающие износ объектов в полиграфии.

**Ключевые слова:** износ, износостойкость, классификация видов износа, полиграфическое оборудование, полиграфическая продукция, печатная форма

**Введение.** Изучение износа и повышение износостойкости — это одна из важнейших задач промышленности, поскольку ремонт и обновление парка оборудования всегда связаны со значительными денежными расходами и временными потерями. Именно благодаря глобальности данной проблемы он изучается во многих отраслях. Однако исследование процессов, протекающих при износе, построение теорий происходит обособленно, в различных отраслях промышленности существуют свои научные школы.

Закономерности абразивного изнашивания в машиностроении установлены фундаментальными исследованиями М. М. Хруцова и М. А. Бабичева [1], М. М. Тененбаума [2], вопросы износа режущих инструментов при изготовлении деталей рассмотрены Г. В. Филипповым [3]. В тоже время износ режущего инструмента в лёгкой промышленности, например, при резании кожевенных материалов, имеет свои особенности, что отмечено в [4]. Исследование износа и возможности повышения долговечности режущих инструментов и деталей в деревообрабатывающей промышленности, сельском хозяйстве и гидроэнергетике представлены в работах [5–7].

Кроме того, следует учитывать, что износ в электрических машинах сопровождается электрическими явлениями, использование смазочных материалов или работа с растворами в оборудовании обуславливает химический износ, в высокоскоростных технологических машинах в большей степени представлен износ из-за трения скольжения и качения и связанных с ними тепловых эффектов и т. д. [8]. Это объясняет большое количество теорий износа.

Однако конечная цель всех исследований — это повышение износостойкости, причём не только конкретных деталей и узлов машины, но и всей рабочей единицы в целом. В работе [9] вводится термин “годность”, который обобщает характеристики служебных свойств машины и её отдельных элементов. Данный показатель характеризует относительную способность и потенциальные возможности машины выполнять свои функции или заданный процесс в пределах допустимых отклонений по качеству и экономичности в течение оптимального срока её службы в производстве [9].

Следует отметить, что на сегодняшний день достаточно хорошо изучены простые виды износа и только некоторые из парных видов. Кроме того, некоторые виды имеют подвиды или сопровож-

Белорусский государственный технологический университет. Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13-а.

+ Автор, с которым следует вести переписку. e-mail: Mediana1980@list.ru.

даются активным процессом, а также контрпроцессом, который по сути препятствует изнашиванию детали. Примером контрпроцесса может служить наклеп в металле, образование которого в результате абразивного износа, позволяет материалу “сопротивляться” изнашиванию.

Целью данной работы являлось обобщение информации о существующих видах износа, создание их наиболее полной классификации и выявление видов износа, характерных для различных объектов полиграфии. На основании разработанной классификации необходимо было получить аналитическое выражение для расчёта износа.

**Объекты и методы исследований.** Проанализировав и обобщив представленную выше информацию, можно объединить и классифицировать все известные виды износа. Результатом является следующая таблица видов износа (табл. 1).

Таблица 1. Виды износа

Группы видов изнашивания	Простые виды изнашивания	Подвиды изнашивания	Активный процесс	Контр-процесс	Смешанные парные виды изнашивания
1. Механическое	1. Абразивное	1) Свободные абразивные частицы:	Микроре- зание, ца- рапание	Наклеп в ме- талле	Абразивно- тепловое
		а) гидроабразивное;			
		б) газоабразивное;			
		в) в массиве частиц (почва и т. д.)			
		2) Контактно-абразивное			
	2. Усталостное	а) свободные частицы;			
		б) закреплённые частицы			
		3. Пластическое			
		4. Питтинг (хрупкое диспергирование)			
		5. Фреттинг (вибро-диспергирование)			Фреттинг-коррозия
2. Атомно-молекулярное	6. Адгезионное (схватывание)				
	7. Тепловое				
	8. Диффузионное				
3. Коррозионное	9. Окислительное				Коррозионно-абразивное
	10. Коррозионное действие агрессивных сред				
4. Эрозионное	11. Гидроэрозионное				
	12. Газоэрозионное				
	13. Электроэрозионное				

Виды износа, характерные для того или иного объекта, определяются конструкцией данного объекта и его материалом, средой, в которой происходит работа или использование объекта. Так в полиграфии можно для примера рассмотреть два принципиально различных объекта износа: печатная машина и полиграфическая продукция. Виды износа, которые можно наблюдать в печатной машине, можно представить в виде табл. 2.

В офсетных печатных машинах выделяют следующие узлы трения: подшипники валов основных цилиндров, контактная группа печатная форма—офсетное полотно—краска—накатной валик, контактная группа офсетное полотно—краска—бумага, трубопроводы с краской и увлажняющим раствором, электродвигатель, поэтому может происходить износ из всех выделенных групп. Абразивное изнашивание в данном случае обусловлено трением вращающихся и движущихся деталей оборудования, а также движением воздуха и рабочих растворов по трубопроводам машины. В качестве свободных частиц, которые могут вызывать абразивный износ, в полиграфии выступают производственная пыль, бумажная и красочная пыль. Усталостный износ характерен для всех ма-

териалов, подвергающихся нагрузкам во время работы, фреттинг возможен из-за вибраций, возникающих во время работы машины на высоких скоростях. Тепловой износ неизбежно возникает в быстро работающем оборудовании вследствие трения деталей. Окислительный износ и коррозионное действие агрессивных сред в офсетных печатных машинах обусловлены использованием в офсетной печати увлажняющего раствора, представляющего собой водно-спиртовой раствор. Этот же факт объясняет и гидроэрозионный износ. Печатные машины являются электрическими машинами, следовательно, в них существует вероятность возникновения электроэрозионного износа.

Таблица 2. Виды износа печатной машины

Группы видов изнашивания	Простые виды изнашивания	Подвиды изнашивания	Смешанные парные виды изнашивания
1. Механическое	1. Абразивное	1) а) б)	Абразивно-тепловое
	2. Усталостное	2) а) б)	
	5. Фреттинг (вибродиспергирование)		Фреттинг-коррозия
2. Атомно-молекулярное	7. Тепловое		
3. Коррозионное	9. Окислительное		Коррозионно-абразивное
	10. Коррозионное действие агрессивных сред		
4. Эрозионное	11. Гидроэрозионное		
	13. Электроэрозионное		

Для полиграфической продукции картина распределения характерных видов износа иная, хотя все четыре группы также представлены в классификации (табл. 3).

Таблица 3. Виды износа полиграфической продукции

Группы видов изнашивания	Простые виды изнашивания	Подвиды изнашивания	Смешанные парные виды изнашивания	Виды печатной продукции
1. Механическое	1. Абразивное	1) а) б)	Абразивно-тепловое	Все виды
		2) б)		Все виды
2. Атомно-молекулярное	7. Тепловое			Все виды
3. Коррозионное	9. Окислительное		Коррозионно-абразивное	Все виды
	10. Коррозионное действие агрессивных сред			Упаковка
4. Эрозионное	11. Гидроэрозионное			Упаковка
	12. Газоэрозионное			Упаковка

Однако не для всех видов полиграфической продукции считается целесообразным изучение износа и повышение износостойкости, хотя на практике эта проблема может стать острой для любого вида продукта. В основном износ изучается для полиграфической продукции, которая подвергается многократному обращению и имеет определённую ценность, например, денежные знаки. Однако книжно-журнальная продукция также может нуждаться в длительных сроках хранения, например, в условиях библиотек, или находиться в условиях интенсивного обращения, например, справочная и учебная литература. Даже газетная продукция, изначально не рассчитанная на длительный срок пользования, в условиях библиотеки должна сохраняться 50—100 лет в виде подшивок. Естественно, что в данном случае возникает проблема сохранения недолговечного носителя информации и для продления срока службы применяются различные методы обработки газет, например, лакирование или ламинирование.

Полиграфическая продукция может подвергаться следующим видам износа в процессе обращения. Абразивное изнашивание свободными частицами возникает при взаимодействии продукции с частицами пыли, песка и другими. Контактно-абразивное обусловлено непосредственным контактом продукта с различными поверхностями и пальцами человека в процессе обращения. Тепловой износ возникает благодаря тепловому воздействию солнечных лучей, рук человека или

нагревательных приборов на продукцию, окислительный — благодаря кислороду воздуха. Коррозионное действие агрессивных сред, гидро- и газэрозионное воздействие характерно в большей степени для упаковочной продукции, которая непосредственно взаимодействует с упакованным продуктом, который может быть жидким, иметь кислую реакцию, содержать спирты и т. д. Однако в некоторой степени последние указанные виды износа присущи и остальной полиграфической продукции, т. к. находясь в контакте с пальцами человека она неизбежно подвергается воздействию выделяемых человеком жидкостей или присутствующих на поверхности загрязнений.

*Формулировка аналитического выражения.* В данной работе предлагается использовать обобщённый подход для определения работы износа, который будет учитывать различные механизмы и факторы износа, свойства изнашиваемого материала и окружающей его среды, а также параметры, посредством которых определяется износ. Таким образом, выражение для определения работы износа  $A_F^{(\alpha,\beta)}$  будет иметь вид:

$$A_F^{(\alpha,\beta)} = \sum_{i=1}^n W_{1,\gamma}^{(\alpha,\beta)}(x_i) + \sum_{i,j=1}^n W_{2,\omega}^{(\alpha,\beta)}(x_i, x_j) + \sum_{i,j,k=1}^n W_{3,\omega}^{(\alpha,\beta)}(x_i, x_j, x_k) + \dots + W_{n,\omega}^{(\alpha,\beta)}(x_i, x_j, \dots, x_n), \quad (1)$$

где  $i$  — механизм износа;  $x_i$  — факторы износа;  $\alpha$  — изнашиваемый материал (1 — металл; 2 — полимер; 3 — резина или эластомер; 4 — бумага или картон);  $\beta$  — изнашивающая среда (1 — твёрдая; 2 — жидкая; 3 — газообразная; 4 — вакуум);  $\gamma$  — вид изнашивания (1 — абразивное; 2 — усталостное; 3 — пластическое; 4 — питтинг; 5 — фреттинг; 6 — адгезионное; 7 — тепловое; 8 — диффузионное; 9 — окислительное; 10 — коррозионное действие агрессивных сред; 11 — гидроэрозионное; 12 — газэрозионное; 13 — электроэрозионное);  $\omega$  — параметры износа (1 — ширина элемента; 2 — высота; 3 — масса; 4 — радиус закругления режущей кромки).

Формула (1) является наиболее полным и общим выражением для определения работы износа. Если рассматривать конкретный объект, то изменятся только составляющие, входящие в данную формулу. Так, например, для печатной машины офсетной печати согласно классификации присущих ей видов износа представленных в табл. 2 в формулу (1) будут входить следующие переменные:  $i$  — механизм износа;  $x_i$  — факторы износа;  $\alpha$  — изнашиваемый материал (1 — металл; 2 — полимер; 3 — резина или эластомер);  $\beta$  — изнашивающая среда (1 — твёрдая; 2 — жидкая; 3 — газообразная; 4 — вакуум);  $\gamma$  — вид изнашивания (1 — абразивное; 2 — усталостное; 5 — фреттинг; 7 — тепловое; 9 — окислительное; 10 — коррозионное действие агрессивных сред; 11 — гидроэрозионное; 13 — электроэрозионное);  $\omega$  — параметры износа (1 — ширина элемента; 2 — высота; 3 — масса).

Аналогично для полиграфической продукции в соответствии с табл. 3 формула (1) будет включать в себя следующие переменные:  $i$  — механизм износа;  $x_i$  — факторы износа;  $\alpha$  — изнашиваемый материал (2 — полимер; 4 — бумага или картон);  $\beta$  — изнашивающая среда (1 — твёрдая; 2 — жидкая; 3 — газообразная);  $\gamma$  — вид изнашивания (1 — абразивное; 7 — тепловое; 9 — окислительное; 10 — коррозионное действие агрессивных сред; 11 — гидроэрозионное; 12 — газэрозионное);  $\omega$  — параметры износа (1 — ширина элемента; 2 — высота; 3 — масса).

Однако оперирование такими функциями достаточно сложно. Как отмечалось выше, на сегодняшний день достаточно полно изучен и описан физический износ, а конкретно абразивный износ трения. Согласно классическим представлениям функция износа имеет следующий вид:

$$dW = adA_F, \quad (2)$$

где  $a$  — материальный коэффициент, зависящий от свойств материалов, среды и условий трения.

В свою очередь работа износа трением определяется через силу трения, которую можно рассчитать с помощью усилия прижима и коэффициента трения:

$$A_F = F_{\text{пр}}s = F\mu s, \quad (3)$$

где  $F$  — усилие прижима;  $\mu$  — коэффициент трения;  $s$  — путь.

Продифференцировав выражение (3) и подставив его в (2) получим выражение для скорости износа  $V_w$ , которая также является величиной постоянной::

$$\beta dW = ds, \tag{4}$$

$$\frac{dW}{ds} = V_w = \frac{1}{\beta}. \tag{5}$$

Таким образом, функция изменения скорости износа будет иметь вид горизонтальной прямой (рис. 1), а износ будет отображаться прямолинейно возрастающей функцией (рис. 2).

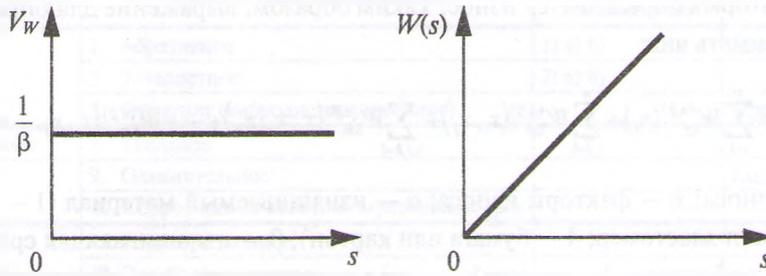


Рис. 1. Функция скорости износа

Рис. 2. Функция износа

Однако логично предположить, что в реальных условиях протекания процесса износа коэффициент  $\beta$  может быть непостоянной величиной и будет изменяться по какому-либо закону. Рассмотрим вариант описания изменения коэффициента износостойкости линейной функцией:

$$\beta = f(s) = b_0 s, \tag{6}$$

где  $b_0$  — материальный коэффициент, зависящий от свойств материалов, среды и условий трения.

Тогда дифференциальное выражение примет вид:

$$\frac{dW}{ds} = \frac{1}{b_0 s} = V_w. \tag{7}$$

Проинтегрировав (7) и приняв  $W_0 = 0$  и  $s_0 = 1$ , получим функцию износа в следующем виде: получим:

$$W(s) = \frac{1}{b_0} \ln(s). \tag{8}$$

Соответственно, в данном случае функция изменения скорости износа примет вид гиперболы (рис. 3), а функция износа — логарифмической кривой (рис. 4).

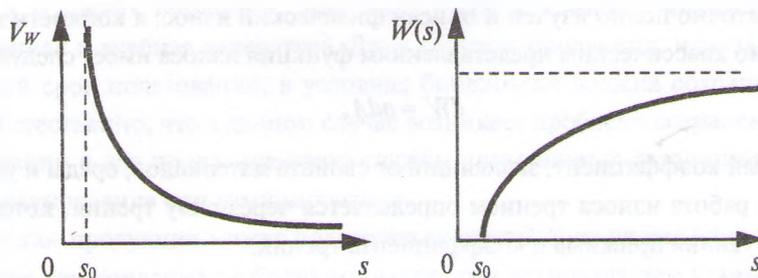


Рис. 3. Функция скорости износа

Рис. 4. Функция износа

Изменение коэффициента износостойкости может также описываться и параболической функцией:

$$\beta = b_0 s(A - s), \tag{9}$$

где  $A$  — материальный коэффициент, зависящий от свойств материалов, среды и условий трения.

Дифференциальное выражение в данном случае будет иметь вид:

$$\frac{dW}{ds} = \frac{1}{b_0 s(A - s)} = V_w. \tag{10}$$

Проинтегрировав (10) получим:

$$W(s) = \frac{1}{Ab_0} \ln \left[ \frac{(A - s_0)s}{s_0(A - s)} \right]. \tag{11}$$

Графическое представление функции скорости износа будет иметь вид, представленный на рис. 5, а функции износа — на рис. 6.

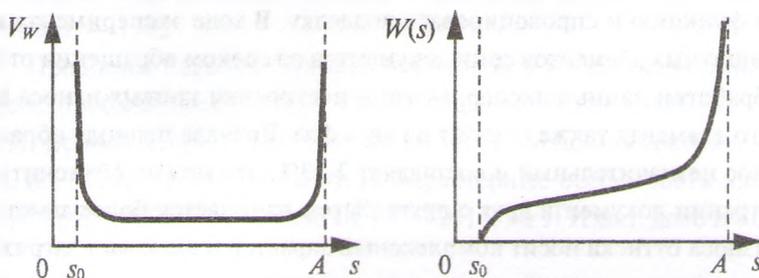


Рис. 5. Функция скорости износа

Рис. 6. Функция износа

Следует отметить, что полученные графики функций соответствуют характеру нарастания износа деталей, описанному в [2].

*Оценочные испытания.* Для проверки предложенных теоретических положений были проведены эксперименты по оценке износа для двух полиграфических объектов, износ которых оказывает существенное влияние на результат полиграфического процесса — качество полиграфической продукции: печатная форма офсетной печати и оттиск, содержащий напечатанные защитные элементы.

Печатные формы являются одним из самых дорогих расходных материалов процесса печати. В процессе печати тиража они должны сохранять неизменными свои свойства. Однако в процессе эксплуатации происходит изменение исходного состояния поверхностных слоёв и структуры печатных форм. Эксперимент проводился в условиях предприятия ОАО «Красная звезда» для офсетных печатных форм газетной печати, которые были изготовлены с формных пластин Agfa Thermal P960. Для анализа изменения печатного элемента на форме отбирались образцы оттисков после печати: от 1 тыс. до 12 тыс. листопрогонов с интервалом 1 тыс. Изменение состояния формы оценивалось по изменению размеров буквы на оттиске [10]. Функция износа вертикального штриха представлена на рис. 7. Адекватность полученной модели проверялась по критерию Фишера.

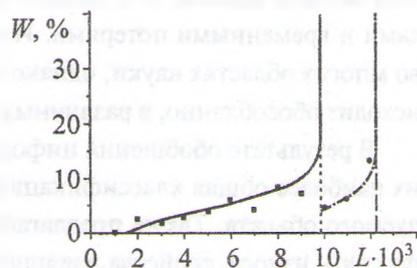


Рис. 7. Зависимость износа печатной формы от количества листопрогонов:  
 — — теоретическая функция износа 1-ого вида; ■ — эксперимент;  
 - - - - - асимптота; - - - - - теоретическая функция износа 2-ого вида;  
 ● — эксперимент; — — асимптота

Функция износа в данном случае отражает зависимость изменения вертикального штриха от количества листопрогонов. Износ офсетной печатной формы разделяется на две составляющие: механическую и физико-химическую. Механический износ первой стадии характеризуется проявлением трения между формой и офсетным полотном, трением между формой и накатными валиками увлажняющего и красочного аппаратов, сошлифовыванием поверхности абразивными частицами, содержащимися в составе краски, а также абразивным действием бумажной пыли, отделяющейся при печатании от поверхности бумаги. Начиная с 7 тыс. листопрогонов параллельно с механическим износом происходит потеря физико-химической устойчивости элементов формы, которая сопровождается нарушением равновесия между молекулярными силами, действующими на границах раздела печатающие элементы—краска, пробельные элементы—увлажняющий раствор и краска—увлажняющий раствор [10]. Следствием нарушения может быть увеличение или уменьшение размеров печатающих элементов. Изменение физико-химических свойств начинается с 9,9 тыс. листопрогонов. Таким образом, предельное значение тиражестойкости формы составляет 12,3 тыс. листопрогонов.

Оттиск с напечатанными защитными элементами в процессе интенсивного обращения изнашивается, и, соответственно, изнашиваются защитные элементы, в результате документ может утратить защитную функцию и спровоцировать подделку. В ходе эксперимента измерялась оптическая плотность защитных элементов семи документов со сроком обращения от 0,14 до 6,36 лет.

В результате обработки данных эксперимента и построения кривых износа было определено, что износ защитного элемента также состоит из двух фаз. Вначале периода обращения (примерно в течение года) износ незначительный и составляет 2—3%, это можно объяснить лёгким абразивным истиранием страниц документа друг о друга. Затем начинается более заметный процесс старения. Механизм износа оттиска носит комплексный характер и включает загрязнение в результате разложения компонентов печатной краски и переходе их со страницы на страницу, попадание внешних частиц, в основном органической природы, при контакте с руками человека, паров, аэрозолей различных веществ, которые могут находиться в местах хранения и пользования документами. К десяти годам обращения износ защитного элемента составит 63%. Предельный срок использования документа с таким защитным элементом, согласно асимптоте процесса, составляет 16 лет.

Проанализировав полученные в обоих экспериментах зависимости, можно отметить, что использование функции вида (11) позволяет наилучшим образом описать характерные особенности износа объектов в полиграфии.

**Выводы.** В данной работе показано, что изучение износа и повышение износостойкости является важной задачей, т. к. ремонт и обновление парка оборудования связаны с денежными расходами и временными потерями. Исследование процессов, протекающих при износе, выполняется во многих областях науки, однако в силу специфики каждой отрасли развитие научных школ происходит обособленно, в различных отраслях промышленности существуют свои теории износа.

В результате обобщения информации о существующих и изученных видах износа предлагается их наиболее общая классификация, которую можно использовать в качестве исходной для исследуемого объекта. Также предлагается формула, которая позволит учесть различные механизмы и факторы износа, свойства изнашиваемого материала и окружающей его среды, а также параметры, посредством которых определяется износ. Определены виды износа для двух объектов полиграфии: печатных машин и полиграфической продукции.

Для наиболее изученного вида физического износа посредством трения получен ряд аналитических выражений для функции износа и функции изменения скорости износа при условии постоянства коэффициента износостойкости, его изменения по линейному и параболическому закону.

Приведены результаты оценочных испытаний по оценке износа печатных форм офсетной печати, оттисков с напечатанными защитными элементами.

### Литература

1. Хрущев М. М., Бабичев М. А. Абразивное изнашивание. — М.: Наука. — 1970
2. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию. — М.: Машиностроение. — 1976
3. Филиппов Г. В. Режущий инструмент. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние. — 1981
4. Максимов А. В., Кочетков А. С. Анализ затупления винтообразного ножа кожевенной машины при неравномерном износе // Сервис в России и за рубежом. — М.: Наука. — 2011, № 5, 77—89
5. Моисеев А. В. Износостойкость дереворежущего инструмента. — М.: Лесная промышленность. — 1981
6. Ткачев В. Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. — М.: Машиностроение. — 1971
7. Дульнев В. Б. Абразивный износ радиально-осевых гидротурбин и методы борьбы с ним. — Л.: Госэнергоиздат. — 1962
8. Семенов А. П. Проблемы борьбы с трением и износом в машиностроении // Научно-технический прогресс: проблемы ускорения. — М.: Наука. — 1987, № 6, 40—50
9. Селиванов А. И. Основы теории старения машин. — М.: Машиностроение. — 1971
10. Барковский Е. В., Медяк Д. М., Кулак М. И. Характерные особенности износа офсетных печатных форм // Труды БГТУ. — Минск: БГТУ — 2015, № 9: Издат. дело и полиграфия, 3—6

Поступила в редакцию 10.05.17

Miadziak D. M. and Kulak M. I. Theoretical Bases of Wear Formation and Wear Resistance Management in Printing.

In the article types of wear characteristic are revealed for various objects of printing: printing machines and products. The article proposes a formula that contains various mechanisms and wear factors, parameters determining wear, material properties and environments.

**Keywords:** wear, wear resistance, classification of wear types, printing equipment, printing production, printing plate.